

朝鮮総督府鉄道局による複斜材型トラス橋梁の開発と建設

高橋 良和¹・小嶋 進太郎²・Mya San Wai³

¹正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

²正会員 鹿島建設 (元 京都大学工学部地球工学科)

³学生会員 京都大学博士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

本研究では、第二次世界大戦末期に朝鮮半島で建設された複斜材型トラス橋梁について、朝鮮総督府鉄道局の小田彌之亮技師による回顧や当時の雑誌等の記述を組み合わせることにより、その開発の経緯を整理した。戦争時に爆撃の対象となる重要構造物である橋梁について、昭和10年代に行われた耐弾性能を高めるための技術的検討を整理し、単に不静定次数を高めるのではなく、内的不静定、外的不静定、吊構造などの異なる技術の組み合わせ（多様性）を推奨していたこと、また複斜材型トラス橋梁の構造計算は、近似的解法による一次応力の算出だけでなく、曲げによる二次応力も算出し、合理的な設計が行われ、その精度が極めて高いことを証明した。特に、中国と北朝鮮間の国際橋梁である鴨緑江大橋について、その設計、架設状況について整理した。

Key Words : Double diagonal truss bridge, Government-general of Korea, bombing-resistant bridge

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

朝鮮半島に初めて鉄道が開設されたのは、京仁線が開通された1899(明治32)年であり、1905(明治38)年には京城(ソウル)と釜山間を結ぶ京釜線が開通、1906(明治39)年には京城と新義州間を結ぶ京義線が開通し、朝鮮半島において早期に鉄道の縦貫ルートが実現されていた¹⁾。その背景には、1894(明治27)年の日清戦争、1904(明治37)年の日露戦争での勝利により、事実上、英米露より朝鮮(大韓帝国)に対する支配権が認められた日本が大きく関わっており、1910(明治43)年の朝鮮併合により朝鮮総督府が設立した。以後、1945(昭和20)年の終戦まで、35年に渡り朝鮮総督府が鉄道運営を担当した。総督府設立以前も含め、鉄道局により多くの資料²⁻⁵⁾が取りまとめられている。

一方、1937(昭和12)年の支那事変が勃発、1927(昭和2)年から進められてきた既存路線の改良工事が拡大、京釜、京義線複線工事が急速に進められ、高次の規模と技術的内容は従来の改良工事に比べて質、量とも桁外れの大型となった。しかしながら、本格的な適用は1940(昭和15)年～1945(昭和20)年であり、その成果の公表は極めて限定的であり、かつ情報が不完全であるものがほとんどであるのが現状である。

1936(昭和11)年以降、空爆による交通網の遮断が現実的な問題となり、通常の設計荷重(死荷重や活荷重など)とは異なる状況を想定せざるを得なくなり、その対

策が構造技術者に求められた。空爆を受けることを想定した上で桁が墜落しにくいように配慮された耐弾橋梁が開発、建設され、これらは世界でも例をみない構造であった⁶⁾ことは広く知られていない。これら戦時下におけるこれらの橋梁研究を、設計想定と異なる作用に対する落橋対策として耐震設計を考えるための有用な情報として、高橋⁷⁾が文献調査を行ったが、実際に建設に至った事例は紹介されていない。本論文は、朝鮮総督府鉄道局が主体となり、当時の官民学の橋梁工学者がその開発に携わった複斜材型トラス橋梁の開発、建設を取りまとめることを目的とするものである。

(2) 調査の方法

複斜材型トラス橋梁の開発経緯は文献調査に基づいている。具体的な橋梁名を含む基礎調査には朝鮮総督府鉄道局職員の同窓会である鮮交会(平成8年解散)による『朝鮮交通史』⁸⁾、『朝鮮交通回顧録(工務・港湾編)』⁹⁾を用いた。

1945(昭和20)年以前に公表された資料として、朝鮮総督府鉄道局技師による『複斜材構ノ應力』¹⁰⁻¹²⁾に加え、雑誌『道路』¹³⁻¹⁶⁾、『土木技術』¹⁷⁾、『土木ニュース』¹⁸⁾、『科学朝日』¹⁹⁾および大学紀要『九州帝国大学工学彙報』^{20,21)}から複斜材型トラス橋梁の開発に関する記述が確認された計9編の報文を抽出したが、これらには具体的な位置や橋梁名が類推できる記述は検閲等により記されていない。これら報文の内容を、史実との整合性を確認するとともに確証の内容について補完した。

2. 耐弾橋梁

橋梁の使命(性能)は、第一に利便、第二に耐久力、第三に外観であるが、これに加え、戦時下における橋梁の使命は、運輸状態並びにその運輸状態の変化に即応することである。平時において、橋梁は交通の要諦であることは勿論であるが、それが故に、戦時下では橋梁は恰好の爆撃目標となる。しかも故意に破壊させようとするため、橋梁の損傷は避けられないことが前提であり、その上で橋梁の墜落、崩壊が生じにくい性能が求められた。このように爆弾(主に空爆)を想定した耐墜落性能を有する橋梁を耐弾橋梁(または耐爆橋梁)と呼ぶ。

耐弾橋梁については、防空橋梁も含め、当時広く議論されていた²²⁻²⁹⁾。朝鮮総督府においては、朝鮮交通史によると、「爆撃その他の原因で桁の一部が折損しても、桁が墜落し難いようなものは出来ないものか。若しそのような抵抗の強い構造のものが考えられるならば、その条件は満たされることになる。しかし当時はこんな課題に関する資料も文献もなかったが、しかも当面の重大な懸案なので、前記の橋梁学の3教授に指導を仰ぐことにした。」³⁰⁾とある。この述懐をしたのは鉄道局技師である小田彌之亮であり、朝鮮鉄道橋梁の中心的な役割を果たした。また指導を仰いだ3教授とは、東京帝国大学教授の田中豊、京都帝国大学教授の高橋逸夫、そして九州帝国大学教授の三瀬幸三郎である。

3. 複斜材型トラス橋梁の開発に関わった技術者

(1) 小田彌之亮

1927(昭和2)年に九州帝国大学を卒業し、技手として朝鮮総督府鉄道局に入局、1933(昭和8)年に技師に昇格、1934(昭和9)年に本局建設課へ異動した³¹⁾。1936(昭和11)年建設課工事係長³²⁾、1937(昭和12)年建設課設計係長³³⁾として、建設課所管の橋梁を担当した。当時の主要橋梁は建設課所管よりむしろ京釜京義線の改良工事関係が多かったため、1940(昭和15)年より建設課設計第二係長³⁴⁾として橋梁建設を担当するとともに、改良課・保線課の技師も兼務、建設・改良双方の橋梁を設計から製作まで一貫して担当した。1943(昭和18)年に朝鮮総督府の組織が改変され、鉄道局所管業務は交通局の所管となり技術研究所が設置され、所長³⁵⁾となり、鋼桁の設計、製作監督、架設計画まで担当一貫して実施した。また1942(昭和17)年より京城帝国大学理工学部講師³⁶⁾として、施工法の講義を担当した。

小田は耐弾橋梁である複斜材型トラス橋梁の開発を主導し、その成果を書籍「複斜材構ノ應力」第1巻に取



図-1 小田彌之亮³⁷⁾

りまとめ、第2巻には一次応力近似解法の誤差、数種の形の複斜材構の比較、細部構造に関する問題等を、そして第3回には特殊研究が記載される三部作が計画された。1941(昭和15・皇紀2601)年に第1巻¹⁰⁾、1943(昭和18・皇紀2603)年に第2巻¹¹⁾が発刊されたが、第3巻は終戦の混乱のためか発刊されなかったようである。これらの成果は東京帝国大学に博士論文「複斜材構ノ應力」¹²⁾として提出された。前記の第2巻を主論文とし、参考論文として第1巻も添付された。審査の結果、1944(昭和19)年1月13日、工学博士の学位が授与された。

(2) 田中豊

1913(大正2)年東京帝国大学を卒業、鉄道院に奉職。初期のころは鉄道土木一般の設計に従事し、関東大震災が発生するに及び、新設の帝都復興院に兼務となり、土木局橋梁課長を務め、震災復興事業に関わって以後は橋梁の研究と技術開発に専心することとなり、永代橋、清洲橋など隅田川諸橋の建設にあたり、独自の構想に成る構造形式を生み出した。1925(大正14)年からは復興院、鉄道省技術研究所に加えて東京帝国大学教授も兼ね、土木工学第三講座(橋梁工学)を担当した。日本の橋梁技術が欧米の模倣を脱して独自の歩みを始め、今日世界最高の水準に至るまでの指導的役割を果たしたのが田中の最大の功績と言える。没後、勲二等旭日重光賞を叙勲され、その功績を記念して「土木学会田中賞」が設けられていることは広く知られている³⁸⁾。

耐弾橋梁については、橋梁の爆撃とその対策について、1942(昭和17)年頃より、雑誌『道路』^{14,15)}や『土木技術』¹⁷⁾において発表しており、墜落後の復旧性に関する検討も行っている。また、米国で行われた係留された軍艦に対する投下爆弾の命中率をもとに、田中は橋梁に対する爆弾命中率を概算し¹⁷⁾、投下高度の低い時、急降下投弾の時(角度が小さい時)は比較的命中率が高くなり、幅員に比例するが、投下高度が高い場合、命中率は比較的小さく、橋梁の一部材を切断することは極めて稀と判断している。

(3) 高橋逸夫

1913(大正2)年に京都帝国大学を卒業し、1925(大正14)年3月より1948(昭和23)年1月まで、二見鏡三郎の後任として京都帝国大学土木工学第一講座(橋梁工学)を担当。助教授時代には独・仏・米各国における留学を経験し、ベルリン工科大学でミューラー・ブレスラウ教授に師事して橋梁工学の理論を研究した³⁹⁾。同教授は、1930(昭和5)年2月「橋梁工学特論」第1巻を、1935(昭和10)年7月「応用力学」上巻を著述、また橋梁の強度、合成を実験によって測定するための装置を考案した⁴⁰⁾。これは撓度記録器・応力記録器・水平振動記録器であって、鉄道省、朝鮮総督府鉄道局および南満州鉄道などで広く実地の橋梁試験に使用された。

耐弾橋梁の開発について、1940(昭和15)年の第四回日本工学会大会⁴¹⁾において講演しており、ラチス型トラスを含む橋梁の耐爆構造や朝鮮総督府鉄道局において採用された形式について、雑誌『道路』¹³⁾や『土木ニュース』¹⁸⁾において発表している。

(4) 三瀬幸三郎

1911(明治44)年に東京帝国大学を卒業後、ただちに九州帝国大学工科大学講師に任ぜられ、翌年助教授に昇任した。1915(大正4)年土木工学研究のため米国に3年間留学し、1919(大正8)年には九州帝国大学教授となり、新設の構造力学講座を担当した。1923(大正12)年から橋梁工学講座を担当し、1946(昭和21)年停年退官まで学生の教育と研究にあたる傍ら、九州帝国大学評議員、弾性工学研究所所長、工学部長を歴任するなど大学運営にも指導的役割を果たした。この間、1937(昭和12)年土木学会賞、1942(昭和17)年西日本文化賞、1947(昭和22)年勲一等瑞宝章の栄に浴した。研究活動の傍ら、福岡高等工学校校長を併任、青少年の教育に尽力するとともに、土木学会西部支部長として西日本における土木工学の発展に寄与した⁴²⁾。

耐弾橋梁について、特に小田ら朝鮮総督府鉄道局による開発に最も密接に関わり、1940(昭和15)年の第四回日本工学会大会⁴¹⁾において講演している。また、三瀬の特筆すべき研究業績に、構造物の弾性変形に関する理論⁴³⁾があり、高次不静定トラス構造の応力算定に威力を発揮するもので、実際に朝鮮鉄道の数多くの複斜材構橋の設計に活用された^{10,11)}。さらにトラス橋の鋼材量を大幅に節約できる初応力調整法を考案、雑誌『道路』¹⁶⁾で発表するとともに、『科学朝日』において朝鮮における複斜材型トラス橋梁の建設時の状況を詳しく紹介している¹⁹⁾。

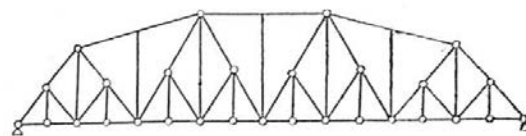


図-2 昭和10年代の最新トラス形式¹³⁾

4. 耐弾橋梁を成立させるための技術

(1) 不静定構造の採用と課題

部材の一部が欠損したとしても直ちに橋桁の墜落を防止するためには、不静定次数を高めることが有用であることは構造技術者としては常識であるが、当時の時代背景を踏まえて議論することが必要である。昭和10年代まで、鉄道橋梁に広く採用されていたのは単純トラス桁である。高橋¹³⁾は橋梁発達の歴史を踏まえて考察しており、鉸桁から三角形網からなるトラス桁が発達したが、長径間の橋に対しては、縦桁の長さが大きくなって不経済になるため、斜材を交叉させた複式トラスが採用されるようになったが、格点の数が多いため、図-2に示す主トラスの格間に副構造を挿入して作った分割格間を有するトラス桁が当時の最新様式となった。しかしこれらは静定構造であるため、一部材が切断すると、力学上からは不安定となり、構造全体が破壊するため、耐弾構造としては不適である。そこで、トラス単純桁の内的不静定を高めた構造として、腹部材に冗長部材を追加する方法と、下弦部材を強大にする方法などが提案されていた。

ただし、静定構造に余分の部材を追加することは有効であるものの、もしその余剰部材が単にフェールセーフの目的のみに使用されるのであれば、橋梁はその分重く、また高価となることから、余剰部材が平常においても主構造の一部材として有効に働く形式の方が不経済とならない¹³⁾ことも指摘している。小田は、「高橋逸夫教授の『なるべく網目のような形(ラッチース型)がよいだろう』との御意見にヒントを得て、一応ワーレン型トラスを二組重ねた形のダブルワーレン型を考えた。然しこれも欠点があるので」⁴⁴⁾と回顧している。新設橋梁に対する耐弾橋梁の設計要領を検討した田中は、「一般に不静定構造は耐弾性が大であると考えられるが、支間が特に大きくない限り、構造効率が低下することは必然である。故に静定構造を選び、これになるべく主要応力に関係ない補剛部材を取り付ける方法を講じるのが推奨すべき一策である。」¹⁴⁾と述べており、不静定次数を高めることは理念としては同意できるものの、当時の設計技術では不静定構造を合理的に部材を設計、材料を利用することは困難であったという事情を踏まえた設計を提案している。

(2) 多様性のある対策の組み合わせの推奨

耐弾橋梁として、どの形式を選択するかについては、径間長や地質地形などの条件および国防上の重要性によって種々の形式が考えられるが、三瀬は冗長性に関わる補強仕事をどれだけ施すかによって、第一種、第二種、第三種耐弾橋梁に分類している^{20,21)}。

a) 第一種耐弾構造

腹材補強で内的不静定を高めるか、もしくは支点を増やして外的不静定を高めるか、いずれか一つの補強仕事を施すものであり、耐弾橋梁として設計すべき程の長大橋であれば、第一種補強工作として、是非とも外的補強の連続構造を採択すべきであるとしている。

b) 第二種耐弾橋梁

内外補強のいずれか二工法を併用するものであり、第一弾に連続橋を取ったとすれば、これによって弦材は一二破損してもその形を維持するのに差し支えないため、第二段の補強工作としては腹部材の増強を図るべきとしている。

c) 第三種耐弾橋梁

内外補強の三工法またはそれ以上の工法を合わせ用いるものである(図-3)。前期の二工法で十分とせず、更に万全を期して安全を確保するために第三段の補強仕事を施すものである。先の第二種耐弾橋梁をさらに補強しようとするのであれば、次には第三弦を追加することになり、これには直弦、鉸アーチそして吊弦の三式がある。このうち、直弦式は平行弦のものには応力作用上、また外観上からも推奨できず、また中立面に近いため、常時有効に働かず不経済になると指摘している。残るアーチ弦式と吊弦式について、アーチ弦式は径間の中央において高さが高くなり、最も剛性を必要とする径間の中央で多くの吊材は長くなり、剛度が減ずるが、吊弦式では径間の中央に近く吊材が短いので優れている等の理由から、吊弦式を採用すべきであると指摘している。

5. 複斜材型トラス橋梁の開発

(1) 設計条件

朝鮮鉄道は南満州鉄道と接続することから、広軌軌道が採用されている。当時、南満州鉄道は1934(昭和9)年11月より大連・新京間(704.4 km)を8時間30分で走る「あじあ」を運転しており、日本鉄道省においては、東京・下関間(1,092 km)を広軌線による10時間運転のいわゆる「弾丸列車」の建設計画が具体化される機運にあり、将来はさらに朝鮮海峡隧道案の構想もあった⁴⁵⁾。京釜・京義幹線もこれに対応し、予算の範囲内において、多少なりとも優秀な規格の線路建設を企画し、橋梁に対しては次のような条件が求められた。

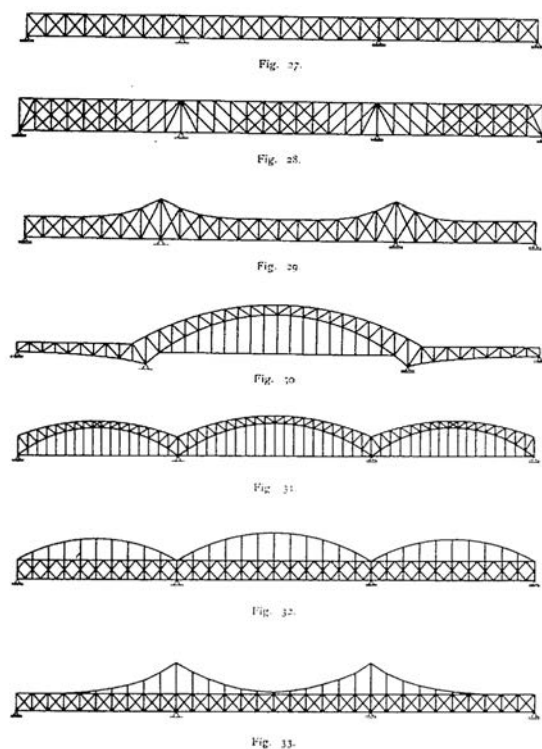


図-3 三種耐弾橋梁の例²⁰⁾

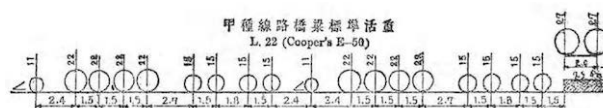


図-4 L-22 活荷重⁴⁷⁾

- 国際幹線橋梁として、国防上高度の耐弾構造たるべきこと。
- 時局に鑑み、極力鋼材を節約すること。
- トラス桁強度はLS-22(図-4)以上とすること。改良課の計画担当によって将来的に輸送力の増強の必要性が指摘され、活荷重L-22とL-25では鋼材の増加は大きくはなかったため、表面上はL-22のまま、実質はL-25に設計修正された⁴⁶⁾。
- 外観美を考慮すること。

(2) 橋梁改築工事の状況

朝鮮東南端の釜山から北西端の新義州までの約950 km(京釜線・京義線)には地形上大河川が多く、特に京城以北に長大橋が必要となる。図-5に示すように鴨緑江大橋、清川江橋梁、漢江橋梁(上下線)、臨津江橋梁(上下線)、大寧江橋梁の7橋が計画された。これらの中で、清川江橋梁、漢江橋梁、鴨緑江橋梁の三橋は橋梁の全長がいずれも1 km前後である。耐弾橋梁は長大橋区間にものみ採用することが適当であり、上記の橋梁を新築するにあたり、耐弾橋梁とすることが求められた。

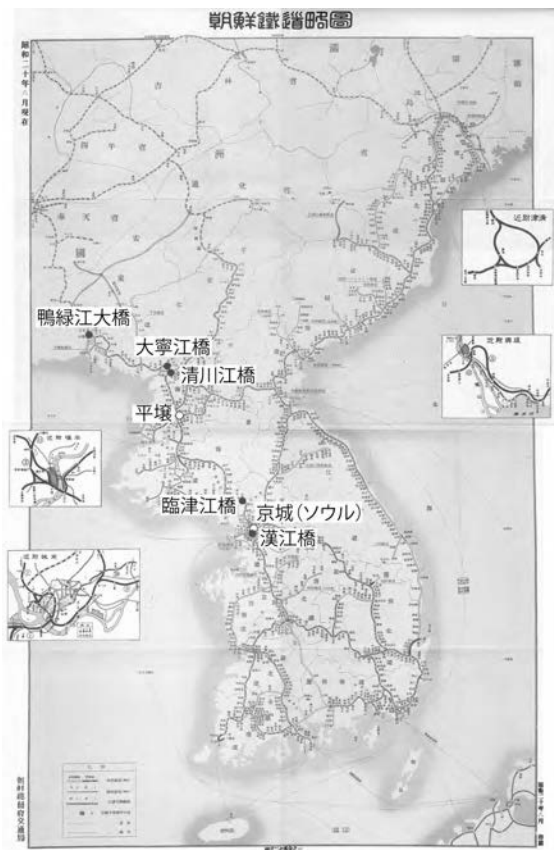


図-5 朝鮮鉄道略図 (5ヶ所の橋梁名と2ヶ所の地名は筆者加筆)

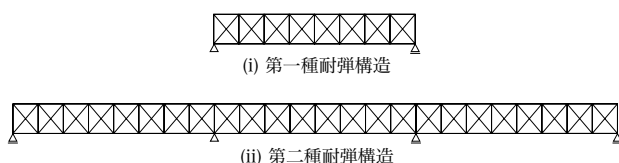


図-6 複斜材型トラス橋梁

(3) 基本構造と特徴

耐弾橋梁に関する検討を踏まえ、小田ら朝鮮総督府鉄道局では、図-6に示す構造形式を基本とする耐弾橋梁を開発し、これを複斜材構（複斜材トラス桁）と呼んだ。本トラス桁は、外観上は垂直材があるワーレントラスを二重にした構造、あるいはブラットトラスとハウトラスを重ねたようにも見え、古くから橋梁のみならずその他の構造にも見られる複式トラス構造であるが、昭和10年代、このような構造に対して完全にその力学的性質が究明されておらず、全ての部材が合理的に設計されてはいなかった。小田らは本構造形式の研究を進め、中間垂直材を有する複斜材型トラス橋である第一種耐弾構造を基本に様々な検討(図-7)が行われ、三瀬による提案により、基礎が良好な地点では三径間連続複斜材型トラス橋梁（第二種耐弾構造）を採用することになった。

小田¹²⁾、三瀬²¹⁾による複斜材型トラス橋梁の特徴、利点は以下の通りである。

- 部材の分布が均等であり、しかも各格間に2つの斜材があつて強剛安定であること。
- 各格点左右対称であるから、構造詳細が簡易であり、外観もよいこと。
- 他の複式構造に比べて応力作用が明瞭であり、相対する弦材には他のトラスと異なり大体同等の応力を生じ、交叉する斜材も又略同等の応力を受けること。
- 連続橋で逆応力が発生するが、正負のせん断を2つの斜材で分担するから楽であること。
- 長大橋となれば一般に斜材が長くなり、抗压材の設計が厄介であるが、それを複斜材式を採用すると、材長が短くなり設計が容易となること。
- 主垂直材があるので腹材応力の配分がよく、2つの斜材は概ね同様の応力を受けること。
- 他の複式構造に比べて二次応力が小さいこと。
- 垂直材は橋脚上の外は、その応力がおおよそ同じとなるので同様の断面を適用し、これに取り付ける床桁も全て同じものを採用することができて好都合であること。
- トラスが桁の代用としての構造なる点から言えば、単斜材、複斜材トラスのうち最も桁に近いトラスであること。

昭和前期までに日本国内において鉄道院が設計した鋼鉄道橋について、小西ら⁴⁸⁾が整理しているが、国有鉄道最初の本格的な3径間連続トラス（外的不静定）が設計されたのは1932(昭和7)年であり、続く外的不静定トラスの設計は1938(昭和13)年である。つまり、1936(昭和11)年頃、積極的に高次不静定トラス橋梁を設計、建設すること自体、橋梁設計における大きなチャレンジであったことが理解できる。

(4) 構造設計

トラス桁構造の設計にあたっては、応力の解析は格点がピン結合とし、内的不静定である複式トラス構造の設計では、2組の単斜材トラス構造に分け、斜材応力はその格間のせん断力を2斜材平等に負担するとするJohnsonによる近似的解法⁴⁹⁾が採用され、その結果による誤差も些少であるとされていた。現在でも、構造力学は応力法を基本とし、高次不静定を解くのは非常に困難である。そこで試験的に、三瀬が開発した弾性変位解法⁴³⁾が適用された。三瀬の方法は現在のFEMで用いられるような変位法ベースの手法であり、各格点の水平・鉛直変位(p, q値)を変数とする高次連立方程式を解く必要がある。一方、変位法では連立方程式の数は格点の数に依存し、部材の数に依存しない。そ

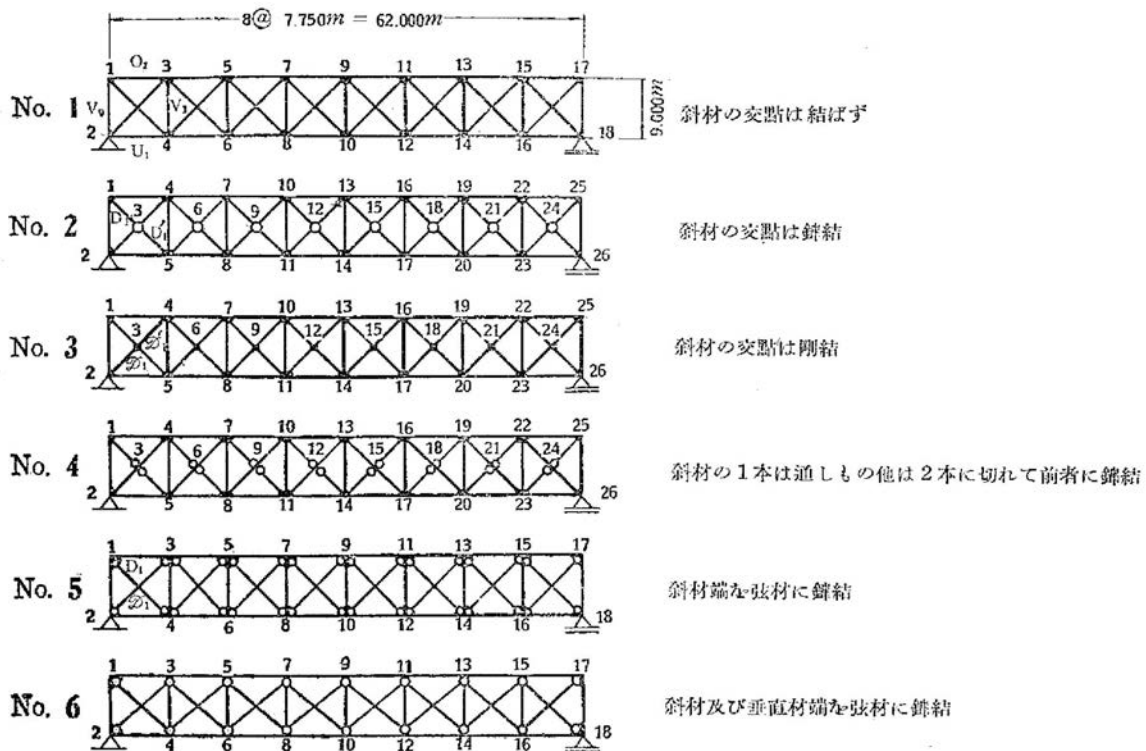


図-7 複斜材型トラス橋梁の検討ケース事例¹⁰⁾

のため、複斜材式構のように多くの部材が配置されたとしても、構造計算の困難さは変化せず、また中間支点が増えると解くべき方程式の数は減るため、本構造形式の計算に適するものであった。

(5) 構造設計の検証

設計計算完了後の実施設計図の作成は、橋梁の種類が多いため莫大な図面数となり時間を要した⁴⁶⁾と記載されているが、現在まで、その部材図面は発見されていない。しかしながら、小田による『複斜材構ノ應力』^{10,11)}において掲載されている各部材の部材長、断面積、断面二次モーメントなどの諸量が記された部材表を確認すると、『朝鮮交通史』⁸⁾で紹介されている昭和11年以降に建設された橋梁一覧の一般図(部材寸法のみ)と一致していることを確認した。つまり、『複斜材構ノ應力』の記載は、設計計算結果を記載していると考えすることは妥当であると判断する。

『複斜材構ノ應力』には、三瀬の弾性変位解法⁴³⁾を適用し、格点の変位、軸力などの一般解(影響線)が算出され、計算されている。弾性解析解法では、まず各格点をヒンジ結合と仮定して各格点の水平・鉛直変位を求め、次に各格点を剛結と仮定して、部材両端の変形に適合するように部材の曲げたわみ変形を特定する。複斜材型トラス橋梁では、合理的に部材を設計するためにも、部材軸力による一次応力のみならず、ト

ラス部材の両端を剛結とした場合に発生する曲げモーメントによる曲げ応力(二次応力)も算出されているところに特徴がある。

当時は手回し式計算機を使用するほかなく、方程式を解くためには並々ならぬ努力と忍耐を要することであり、「方程式数が70程度ものの初めイテラチオン法により試験的に計算したところ、6ヶ月間を費やし未熟のためもあって終に目的を達せず、後幾回繰り返せばよいか検討が就かず、途中にて放棄して了った。次にこれに消去法を試みたところ15日間にて最初のpを得た。消去法に依るときは毎日幾個宛かを消去し得て、努力すればするだけ終極の目標に近づき、常に現在の進行程度と終極の目標が明確であり、従って希望を持ちながら計算を進行せしむることを得た。」¹⁰⁾と回顧している。小田らの計算結果を検証するため、カリフォルニア大学バークレー校で開発が進められている構造解析フレームワーク OpenSees⁵⁰⁾でモデル化し、各格点に単位荷重を載荷させた静的解析を実施した。解析モデルでは、各格点は初めから剛結としている。その結果のうち、複斜材型単純トラス橋梁の中央部の斜材および下弦材の応力に関する影響線図の比較を図-8に示す。点線がOpenSeesによる計算結果であるが、ほぼ小田らの計算結果と一致していることが分かる。下弦材には一次応力に近い二次応力が発生していることも正しく計算されており、複斜材型トラス橋梁を合理的に設計

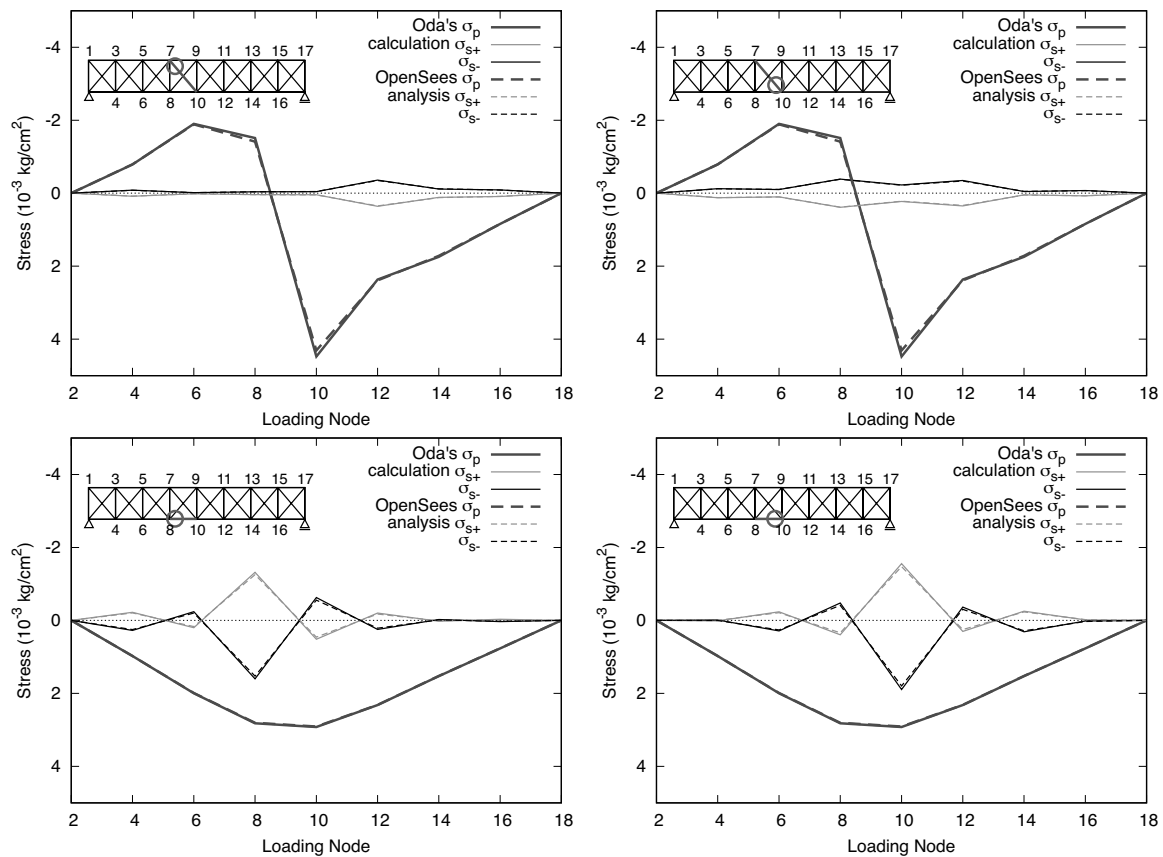


図-8 部材応力影響線の比較 (σ_p :一次応力, σ_s :二次応力 (+上縁, -下縁), 二次応力は緑丸で示した格点側

するためにも、二次応力を踏まえた合成応力による設計が重要であることが、改めて確認できる。

6. 鴨緑江橋梁

(1) 構造形式

鴨緑江橋梁は1909(明治42)年に架けられた単線橋である単純トラス橋梁(以後、旧橋と呼ぶ)に並列して新たに複線橋として架設された(図-9)。鴨緑江橋梁は旧橋の70 m上流に、径間62 mの3径間連続複斜材型トラス橋梁2組(6径間)及び径間94 mの3径間連続複斜材型トラス橋梁2組(6径間)から成る全長943 mの巨大な橋桁が架設された。鴨緑江橋梁のスパン割は、洪水時の流水を考え、旧橋と同じとされた。支間長が長い径間94 mの桁には、朝鮮と満州間の国際橋梁としての重要さを考慮し、第三弦として吊弦材を上弦材の上方に添加して、トラス桁全体を補強した第三種耐弾橋梁である。複斜材型トラス橋梁の設計図面は発見されていないものの、小田の博士論文の付図として、添付されていた青焼き図面が図-10であり、橋梁名は切り取られていたものの、特徴的な吊弦材付3径間連続複斜材型トラス橋梁であり、鴨緑江橋梁であると特定できる。全体の形は吊り橋に見えるがトラス橋であり、吊



図-9 鴨緑江橋梁(撮影:高橋, 左が複斜材型トラス橋梁, 右は旧橋である単純トラス橋梁)

弦材はロープではなく型鋼である(図-11)。その目的はトラスの部分的破損に対する安全度を更に増強することにあった。この吊弦材付複斜材型連続トラス橋梁は朝鮮内に作られた7橋の中でも唯一の橋梁であり、朝鮮鉄道のシンボリック橋梁となった。

(2) 架設について

本橋架設についての公式記録は発見されていないが、『科学朝日』¹⁹⁾に掲載されている橋梁架設中の写真には鴨緑江橋梁に特徴的な吊弦材が確認できる。また、あ

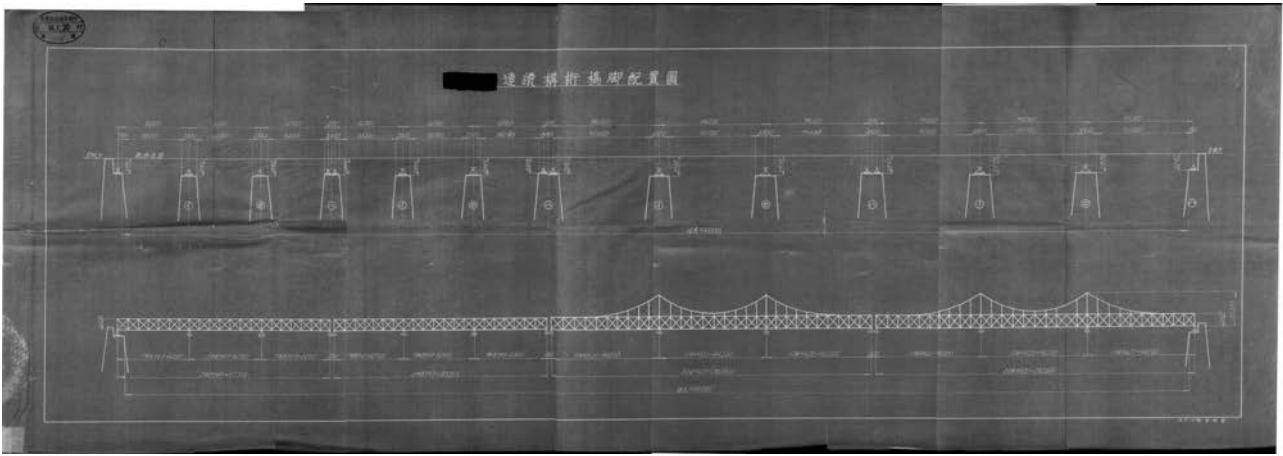


図-10 鴨緑江橋梁とみられる青焼き図面¹²⁾



図-11 鴨緑江橋梁の吊弦材，上弦材，鉛直材（撮影：高橋）

る耐弾橋梁の初応力調整について、三瀬により詳しく報告¹⁶⁾されているが、橋梁名等はないものの吊弦材があることが記載されており、記載されている橋梁が鴨緑江橋梁であることが分かる。この2つの資料により、架設の詳細を読み取ることができるため、ここに取りまとめる。

架橋は南新義州側より進められ、3径間連続橋2組の架橋を1941(昭和16)年秋に完了し、1942(昭和17)年春、解氷期を待って第一主径間の杭打ちをはじめ、3月より組み立てにかかり、5月末に本径間の組み立てが終了した。そして6月初め、最後の仕上げである初応力調整操作を行い、第一主径間を完了した(図-13)。次いで夏の洪水期を避けて9月より第二主径間の架橋を開始、11月上旬に組み立てを終えて、11月18日、19日に最後の初応力調整操作を施工、11月をもって架橋が完成した。

ここで、初応力調整とは、不静定構造であることをいかにして、格点部を上下に強制変位を与えることによって、部材の応力を調整しようとする試みである。本来、不静定構造である連続桁橋梁は、支点部が沈下などの変位を生じることにより、構造物内部の応力が変化し

てしまうことが欠点としてとらえられていた。三瀬はこれを逆に利用して、格点位置を調整することにより最大応力が生じる部材に当初と正反対の応力をきかせて、部材に発生する応力を小さくすることで、鋼材の節約に大きく貢献した。さらに格点部を上げ下げすることの利点として、架橋組み立ての最後の桁の閉合が容易になること、吊弦材に適度な初応力を与えられることを挙げている。図-12には各格点部の下に架設足場が設けられている様子が示されている。通常の建設では、各格点部毎に足場を設ける必要はないが、初応力調整には54個の格点部にジャッキを設置したとあるため、この写真は初応力調整時の写真であると判断できる。格点部に荷重を作用させることで、各部材にどのような応力が発生するかどうかは、図-8のように影響線図を作成済みであるため、予想することができる。「尚此の調整操作に因る添加初應力の検測値と計算値を比較したのでありますが、いずれも先ず満足すべき結果を得た次第であります。」¹⁶⁾と報告されているが、不静定数31という高次の本橋梁においても、正確な設計計算ができていたことを証明するものといえる。

(3) 耐弾対策の効果

新旧2橋は第二次世界大戦では無傷であったが、1950(昭和25)年6月に勃発した朝鮮戦争において、米軍機の空爆を受けた(図-14)。鴨緑江橋梁は中国と北朝鮮との国際橋梁であったため、交戦国であった北朝鮮側のみを攻撃する限定戦略であったが、旧橋は北朝鮮側の橋桁が墜落し、橋脚の一部を水面に残すのみとなった。一方、耐弾橋梁であった鴨緑江橋梁は、橋桁が墜落することなく、現在も中国と北朝鮮を結ぶ国際橋梁として橋梁されている。

鴨緑江橋梁も旧橋と同じく落橋させるべく、米軍が空爆していたことは、『朝鮮交通回顧録』における小田



図-12 各格点位置に足場が建設された初応力調整の状況¹⁹⁾



図-13 第一主径間の初応力調整を終えて最後の据付完了時¹⁹⁾

の回顧より分かる。「私のもとに米占領軍より朝鮮鉄道の橋梁の件で用件あり、本日何時板付飛行場に来いと連絡があった。指定通りに行くと東京第五空軍司令部から一大佐(名を記憶しない)が来て新義州鴨緑江橋梁を破壊するため相当の犠牲を払って大きな爆弾多数をもって空から攻撃するが墜ちない。調べると特殊な工夫がなされておって設計者は君ということが解った。(中略)「筆者は橋脚に穴をあけ、これを爆砕するのがよかろう。橋桁はなかなか落ちないからと言った。」⁵¹⁾ということから分かる。また、橋脚に直接破壊工作しないことには、橋桁を墜落させることはできないといったことは、空爆に対する配慮に対する自信を感じさせる発言である。回顧録では、「すると彼は米第五空軍で高給で傭うから東京へついて来いと言う。私は戦争はもう嫌だからついて行かぬとことわった。彼は鴨緑江の橋梁はどうしても墜ちないのでお前にはソ連から勲章が来るぞと冗談を言って帰った。」⁵¹⁾と続く。戦争遂行への賛意とは別として、第二次世界大戦に大きな役割を果たす橋梁に携わった土木技術者の、技術への誇

Photo # 80-G-423495 Bombing Yalu bridges at Sinuiju, North Korea, Nov. 1950



図-14 朝鮮戦争時の鴨緑江橋梁への空襲(米軍撮影, Photo No.80-G-423495, Attacks on Yalu River Bridges, November 1950. Official U.S. Navy Photograph)

りと戦争への反省とが絡み合った複雑な想いも、後進の土木技術者も受け継ぐべき教訓だと考える。

7. まとめ

本研究では、第二次世界大戦末期に朝鮮半島で建設された複斜材型トラス橋梁について、その開発の経緯を整理した。本研究で得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 戦争時に爆撃の対象となる重要構造物である橋梁について、昭和10年代に行われた耐弾性能を高めるための技術的検討を整理した。不静定次数を高めることが耐弾性能を高めることが効果的であることは認識されていたものの、合理的な構造設計をすることの困難さもあり、全面的に推奨されていた状況ではなかった。しかし、極めて厳選した長大橋梁においては、単に不静定次数を高めるのではなく、内的不静定、外的不静定、吊構造などの異なる技術の組み合わせ(多様性)を推奨された。
- 複斜材型トラス橋梁の構造計算は、朝鮮総督府鉄道局の小田を中心として、近似的解法による一次応力の算出だけでなく、三瀬による弾性変位解法により曲げによる二次応力も算出し、合理的な設計が行われた。また、コンピュータによる数値解析により、部材応力の影響線図を算出したところ、小田による計算結果とほぼ同じ結果を得、当時の設計計算能力の高さを確認した。
- 耐弾橋梁の中でも特に特徴的である鴨緑江大橋について、現地での調査および検閲などの不完全な当時の資料を重ね合わせるにより、その架設

の状況を明らかにすることができた。特に不静定構造の欠点と考えられた支点変位による内部応力の発生を逆に利用して、適切に初期の応力を作用させたことは、設計計算の正確さに支援され、非常に効果的であったと判断できる。

参考文献

- 1) 李容相: 日本統治期の朝鮮鉄道, 東洋文化研究, Vol. 16, pp. 115-146, 2014.
- 2) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道史 全, 1915.
- 3) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道史 第一卷, 1929.
- 4) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道史 第一卷, 1937.
- 5) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道四十年略史, 1940.
- 6) 成岡昌夫: 土木資料百科, 技報堂出版, pp. 96-97, 1990.
- 7) 高橋良和: 戦時下における橋梁研究文献調査から読み取る危機耐性, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 511-514, 2017.
- 8) 鮮交会: 朝鮮交通史, 1986.
- 9) 鮮交会: 朝鮮交通回顧録 (工務・港湾編), 1973.
- 10) 小田彌之亮: 複斜材構ノ應力, Vol. 1, 丸善株式会社, 1941.
- 11) 小田彌之亮: 複斜材構ノ應力, Vol. 2, 丸善株式会社, 1943.
- 12) 小田彌之亮: 複斜材構ノ應力, 博士論文, 東京帝国大学, 1944.
- 13) 高橋逸夫: 橋梁の耐爆構造に就て, 道路, Vol. 2, No. 11, pp. 12-14, 1940.
- 14) 田中豊: 橋梁の爆撃と其の対策, 道路, Vol. 4, No. 1, pp. 23-26, 1942.
- 15) 田中豊: 戦争と橋梁, 道路, Vol. 5, No. 1, pp. 20-21, 1943.
- 16) 三瀬幸三郎: 耐弾橋梁の初応力調整に就て, 道路, Vol. 5, No. 8, pp. 11-16, 1943.
- 17) 田中豊: 橋梁の爆撃と其の対策, 土木技術, Vol. 3, No. 9, pp. 39-42, 1942.
- 18) 高橋逸夫: 鋼構橋の耐爆構造に就て, 土木ニュース, Vol. 19, No. 5, pp. 13-14, 1943.
- 19) 三瀬幸三郎: 橋梁の耐爆構造, 科学朝日, Vol. 4, No. 5, pp. 32-39, 1944.
- 20) 三瀬幸三郎: 耐弾橋梁に関する研究 (其一), 九州帝国大学工学彙報, Vol. 15, No. 4, pp. 260-263, 1940.
- 21) 三瀬幸三郎: 耐弾橋梁に関する研究 (其二), 九州帝国大学工学彙報, Vol. 15, No. 5, pp. 265-271, 1940.
- 22) 鷹部屋福平: 耐弾性新型長大径間の橋梁に就て, 土木学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 889-895, 1941.
- 23) 鷹部屋福平: 耐弾橋梁に就いて, 土木雑誌, Vol. 18, No. 3, pp. 3-5, 1942.
- 24) 鷹部屋福平: 防空上より観たる橋梁, 道路, Vol. 4, No. 1, pp. 27-28, 1942.
- 25) 鷹部屋福平: 戦時下に於ける橋梁設計の特殊性, 道路, Vol. 4, No. 5, pp. 4-5, 1942.
- 26) 鷹部屋福平: 橋梁建設と防空, 科学技術, Vol. 1, No. 12, pp. 68-73, 1942.
- 27) 河村協: 現戦時下の土木工法, 山海堂, 1942.
- 28) 山内寛, 岡本大一: 満鐵所管鐵道橋の概観, 土木満州, Vol. 2, No. 5, pp. 28-36, 1942.
- 29) 畑中健三: 各種橋梁の發達並に戦時下の橋梁, 理工図書株式会社, 1944.
- 30) 前掲 7), p.324.
- 31) 朝鮮総督府: 朝鮮總督府及所属官署職員録, 1934.
- 32) 朝鮮総督府: 朝鮮總督府及所属官署職員録, 1935.
- 33) 朝鮮総督府: 朝鮮總督府及所属官署職員録, 1936.
- 34) 朝鮮総督府鉄道局: 職員録, pp. 23,26,30, 1940.
- 35) 朝鮮総督府交通局: 公報 号外 (5), p. 8, 1943.
- 36) 京城帝国大学: 京城帝国大学一覽, p. 208, 1942.
- 37) 日本ポルトランドセメント同業會: コンクリート講演會講演集 (第七集), 1937.
- 38) 伊藤學: 田中豊 (土木の 100 人), 土木学会誌, Vol. 68, No. 9, p. 44, 1983.
- 39) 松本勝, 成岡昌夫: 高橋逸夫, 京大土木百年人物史, pp. 182-183, 1997.
- 40) 高橋逸夫: 撓度, 応力並に水平振動記録器就いて, 京都帝国大学工学部中央実験所講演集, Vol. 2, pp. 79-96, 1941.
- 41) 日本工學會: 第四回工學會大會記録, p. 46, 1940.
- 42) 太田俊昭: 三瀬幸三郎 (続土木の 100 人), 土木学会誌, Vol. 69, No. 6, p. 42, 1984.
- 43) Mise, K.: General Solution of Secondary Stresses, *World Engineering Congress Tokyo 1929*, Vol. 10, pp. 241-261, 1931.
- 44) 前掲 8), p.191.
- 45) 前掲 7), pp.305-382.
- 46) 小田彌之亮: 朝鮮交通回顧録 (工務・港湾編), 鮮交会, chapter 朝鮮鐵道の橋梁, pp. 186-204, 1973.
- 47) 朝鮮国有鐵道建設規程, 官報 第 312 号, pp. 253-257, 1927.
- 48) 小西純一, 西野保行, 中川浩一: 大正・昭和前期における鋼鐵道橋の發達とその現況, 土木史研究, Vol. 22, pp. 257-267, 2002.
- 49) Johnson, J., Bryan, C. and Turneure, F.: *The theory and practice of modern framed structures*, John Wiley and Sons, 1895.
- 50) University of California, Berkeley: OpenSees Web Site, <http://opensees.berkeley.edu>, (2018/4/8 閲覧).
- 51) 前掲 8), p.204.

(2018. 4. 9 受付)

DEVELOPMENT AND CONSRUCTION OF DOUBLE DIAGONAL TRUSS BRIDGES BY RAILWAY BUREAU OF GOVERNMENT-GENERAL OF KOREA

Yoshikazu TAKAHASHI, Shinaro KOJIMA and Mya San Wai

Double diagolan truss bridges in the Koreaon Peninsula during the end of World War II were newly developed bombing-resistant structural type by Railway Bureau of the Government-General of Korea. The background of development and construction was summarized based on memoirs by engineers of Railway Bureau and technical magazines before 1940. To improve bombing-resistant performance, diversity (combination) of different technologies such as internal and external statically-indeterminant, suspension structure and etc. was recommended. Finally the process of design and construction of Yalu river bridge between China and North Korea and its bombing-resistent performance were summarized.